

Dr.-Ing. F. Bergtold: Für den jungen Funktechniker

22. Die Spule an Wechselspannung

Unsere Spule

Um die Zusammenhänge klar übersehen zu können, brauchen wir einfache Verhältnisse. Diesen zuliebe nehmen wir an, daß unsere Spule trotz vieler Windungen nur einen verschwindend geringen Drahtwiderstand habe, daß keine Wicklungskapazität vorhanden sei und daß auch – abgesehen vom fehlenden Drahtwiderstand – keine sonstigen Verluste in ihr auftreten.

Der Widerstand der Spule

Wir schließen die Spule an das Wechselstromnetz an (Bild 1). Trotz ihres vernachlässigbaren Drahtwiderstandes läßt die Spule einen nur mäßigen Strom durch sich hindurch. Aus der angelegten Spannung und dem Spulenstrom können wir den Widerstand der Spule in der uns bekannten Weise ermitteln: Wir teilen die Spannung durch den Strom und erhalten so den Wert des Widerstandes. Setzen wir die Spannung in Volt und den Strom in Ampere ein, so ergibt sich der Wert des Widerstandes in Ohm.

Trotz dieses Spulenwiderstandes wird in unserer Spule keine elektrische Arbeit in Wärme umgesetzt, wie das etwa in einem Widerstandsstab ge-

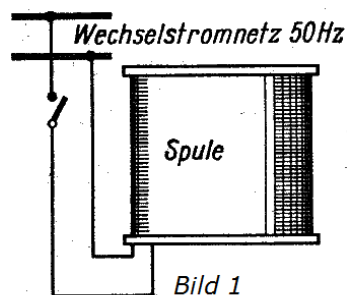


Bild 1

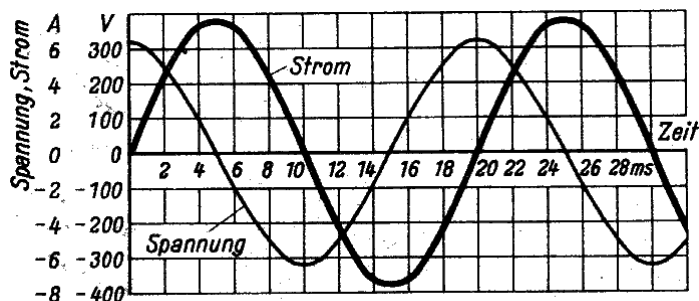


Bild 2

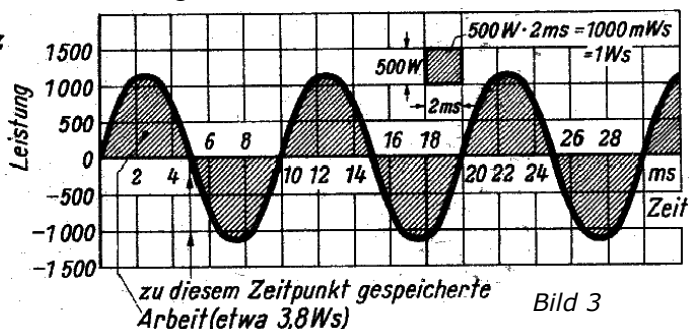


Bild 3

schieht. Der Spulenstrom eilt nämlich der Spannung um ein Viertel einer Periode nach, was durch Bild 2 veranschaulicht wird.

In Bild 2 sind Strom und Spannung abhängig von der Zeit aufgetragen. Aus ihm können wir daher den zeitlichen Verlauf der elektrischen Leistung ermitteln. Zu diesem Zweck müssen wir die jeweils zusammengehörenden Augenblickswerte der Spannung und des Stromes miteinander

vervielfachen. Bild 3 zeigt das Ergebnis. Wir sehen, daß die Leistung ebenfalls eine Wechselgröße ist – wie die Wechselspannung und der Wechselstrom. Ihre Frequenz aber liegt doppelt so hoch wie die der Spannung oder die des Stromes.

Leistung und Arbeit

Bild 3 läßt erkennen, daß die Leistung während eines Viertels einer Periode der Wechselspannung oder des Wechselstromes positiv, während des nächsten Viertels einer solchen Periode negativ, dann wieder positiv u.s.f. ist. Die Spule nimmt somit einmal Leistung aus dem Netz auf, gibt dann Leistung an das Netz ab, wobei sich Leistungsaufnahme und Leistungsabgabe gegenseitig immer wieder ablösen.

Das Bild 3 hat einen waagerechten Zeitmaßstab und einen senkrechten Leistungsmaßstab. Zum Abstand zwischen zwei einander benachbarten Teilstrichen des Zeitmaßstabes gehört eine Zeitdifferenz von zwei Millisekunden. Auf den Abstand zweier benachbarter Teilstriche des Leistungsmaßstabes entfällt eine Leistung von 500 Watt. Die Arbeit bekommen wir, indem wir die Leistung mit der Zeit vervielfachen.

Wie im oberen Teil von Bild 3 veranschaulicht, entspricht also die Fläche der Arbeit: Ein Quadrat des Liniennetzes hat einen Wert von 1 Ws.

Die gespeicherte Arbeit wird dargestellt durch eine Fläche, die einerseits von der Zeitlinie und anderer-

seits von einer Halbwelle der Leistungskennlinie eingegrenzt ist.

Die Arbeit wurde soeben als „gespeichert“ bezeichnet. Wenn die Spule in den ersten 5 Millisekunden Leistung aus dem Netz aufnimmt und während der nächsten 5 ms wieder im selben Maße Leistung an das Netz abgibt, so ist das nur möglich, wenn während der ersten 5 ms in der Spule bzw. in dem die Spule umgebenden Raum Arbeit gespeichert wurde. Diese gespeicherte Arbeit können wir durch Auszählen der Quadrate ermitteln, die in Bild 3 von einer Leistungshalbwelle abgegrenzt werden. Es ergeben sich ungefähr 3,8 Wattsekunden.

Die Arbeit speichert sich im Magnetfeld

Für unsere Spule war schon zuvor stillschweigend vorausgesetzt, daß der Wert des Magnetfeldes dem des Stromes stets verhältnismäßig ist. Träfe dies nicht zu, so würde zu dem hier zeitlich sinusförmigen Verlauf der Spannung nicht der in Bild 2 dargestellte sinusförmige Verlauf des Stromes gehören.

Wenn aber das Magnetfeld dem Strom proportional ist, verläuft das Magnetfeld zeitlich in prinzipiell gleicher Weise wie der Strom.

Bild 4 zeigt das. Im Einschaltaugenblick hat – wie bisher – die Spannung ihren Scheitelwert. Strom und Magnetfeld weisen in diesem Augenblick den Wert Null auf. Unter dem Einfluß der Spannung bildet sich das Magnetfeld aus. Hand in Hand mit seinem Wert wächst der Wert des Stromes. Entsprechend dem anfangs hohen Wert der Spannung geht der Aufbau des Magnetfeldes zunächst rasch vor sich. Die Geschwindigkeit des Magnetfeldaufbaues wird in dem Maße geringer, in dem der Augenblickswert der Spannung sinkt. Sowie die Spannung den Wert Null annimmt, ist der Aufbau des Magnetfeldes beendet und damit der Scheitelwert des Magnetfeldes erreicht. Von jetzt an beginnt die Spannung mit entgegengesetztem Vorzeichen wie zuvor zu wirken. Sie arbeitet also dem ursprünglichen Feldaufbau entgegen und bewirkt so den Abbau des Feldes. Dieser ist beendet, wenn die Spannung ebenso lang und ebenso stark auf die Spule mit entgegengesetztem Vorzeichen eingewirkt hat wie zuerst für den Aufbau des Feldes.

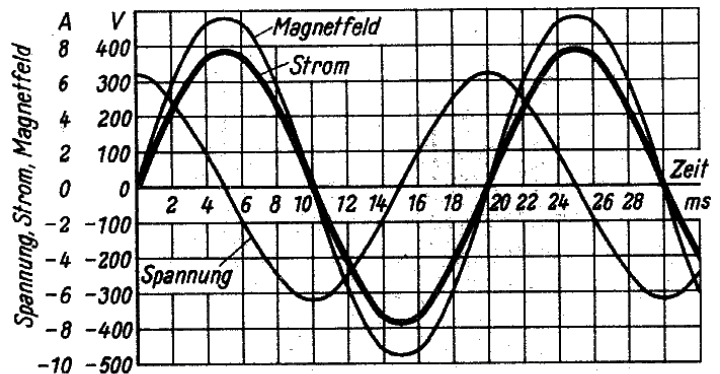


Bild 4

Änderungsgeschwindigkeit des Magnetfeldes als Folge der angelegten Spannung

Wie im vorigen Abschnitt gezeigt, entspricht dem Augenblickswert der Spannung die Änderungsgeschwindigkeit des Magnetfeldwertes. Der Scheitelwert des Magnetfeldes ist das Ergebnis einer Viertelwelle der Spannung.

So, wie wir die Arbeit in Bild 3 aus der von der Leistungskurve abgegrenzten Fläche erhalten haben, können wir für den Magnetfeldaufbau aus der Spannung und der Zeit, während der die Spannung den Aufbau des Magnetfeldes bewirkt, ebenfalls eine Fläche verantwortlich machen. Diese Fläche wird gemäß *Bild 5* durch die Spannungskurve und durch die Zeitlinie eingegrenzt. In Bild 5 bedeutet ein Flächenquadrat 200 mVs. Demgemäß gehört in unserem Fall zum Scheitelwert des Magnetfeldes ein Betrag von rund einer Voltsekunde.

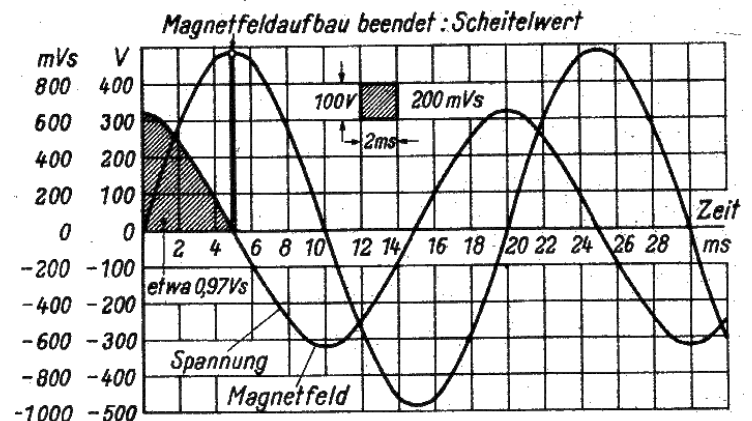


Bild 5

Gegenspannung als Folge der Änderungsgeschwindigkeit des Magnetfeldes

Trotz des fehlenden Drahtwiderstandes ergibt sich beim Anlegen der Netzwechselspannung an unsere Spule nur ein begrenzter Strom. Offenbar wird der Strom dadurch in Grenzen gehalten, daß sich – verkettet mit den Spulenwindungen – ein magnetisches Wechselfeld ausbildet. Diese Tatsache können wir nun auch folgendermaßen betrachten:

Beim Anschluß der Spule an die Netzwechselspannung entsteht ein magnetisches Wechselfeld. Dieses Wechselfeld ist mit der Spule verkettet (*Bild 6*) und ruft in der Spule eine Gegenspannung hervor, die der angelegten Klemmenspannung das Gleichgewicht hält. Der Spulenstrom stellt sich auf den Wert ein, der

die zum Feld gehörende magnetische Wechselspannung liefert.

Also nochmal: Die Klemmenspannung ruft das Magnetfeld hervor. Das Magnetfeld bildet sich derart aus, daß die von ihm herrührende Gegenspannung der Klemmenspannung das Gleichgewicht hält, ihr also entgegengesetzt gleich ist. Der Strom tritt mit dem Wert auf, der das Zustandekommen eben dieses Magnetfeldes bewirkt.

Veränderte Spulenabmessungen

Wir lassen die Spulenwindungszahl ungeändert. Auch den Drahtquerschnitt wollen wir für alle Ausführungen beibehalten. Wir ändern lediglich den Wicklungsdurchmesser. Für halben Durchmesser geht der Feldquerschnitt auf ein Viertel zurück. Da wir stets dieselbe Spannung verwenden, gehört dazu die gleiche Gegenspannung wie beim großen Durchmesser und demgemäß auch wieder der gleiche Wert des Feldes.

Die Felddichte steht für gleichen Wert des Feldes zum Feldquerschnitt im umgekehrten Verhältnis. Bei kleinerem Spulendurchmesser haben wir es mit geringem Feldquerschnitt zu tun. Dementsprechend ist hierfür die Felddichte größer. Weil wir für alle Spulen denselben Drahtquerschnitt vorausgesetzt haben, bleibt die Feldlinienlänge im Magnetfeld bei gleicher Spulenwindungszahl in allen Fällen etwa dieselbe. Die magnetische Spannung verteilt sich auf diese Länge.

Zu höherer Felddichte gehört ein in gleichem Maße größeres magnetisches Spannungsgefälle. Die für das Magnetfeld erforderliche magnetische Spannung, die durch die Amperewindungen der Spule gegeben ist, steigt somit ungefähr im umgekehrten Verhältnis zum Quadrat des Wicklungsdurchmessers. Zu halbem Durchmesser gehört folglich rund vierfacher Strom.

Einfluß der Windungszahl

Wie uns bekannt ist, spielt für das Magnetfeld nicht der Strom allein sondern die Amperewindungszahl die Rolle der magnetischen Spannung. Die elektrische Gegenspannung, von der der vorletzte Abschnitt handelt, kommt in jeder einzelnen Windung als Windungsspannung zustande. Damit tritt die der angelegten Spannung entgegengesetzt gleiche gesamte Gegenspannung als Produkt aus Windungsspannung und Windungszahl auf.

Wir wollen nun studieren, was passiert, wenn wir die Windungszahl der Spule bei gleichem Wicklungsdurchmesser und gleicher Windungslänge (also kleinerem Drahtquerschnitt) auf das Doppelte erhöhen.

Die Spannung verteilt sich jetzt auf zweimal soviel Windungen wie zuvor. Dazu gehört halbe Windungsspannung und mit ihr auch halber Wert des Feldes. Die erforderliche Amperewindungszahl fällt bei halbem Wert des Feldes auch halb so groß aus wie zuerst. Halbe Amperewindungszahl aber bedeutet bei der hier doppelten Windungszahl der Spule nur ein Viertel des Stromes. Einem Viertel des Stromes entspricht bei gleicher Spannung vierfacher Widerstand. Wir gewinnen somit die Regel:

Der zum Magnetfeld gehörende Spulenwiderstand ist dem Quadrat der Windungszahl verhältnismäßig.

Wert des Magnetfeldes und Voltsekunden je Windung

Soeben haben wir den Zusammenhang zwischen Wert des Magnetfeldes und Windungsspannung studiert. Aus diesem Studium ergibt sich, daß als Maß für den Wert des Magnetfeldes nicht die Voltsekunden schlechthin, sondern die auf eine Windung entfallenden Voltsekunden maßgebend sind.

Hieraus ergibt sich ein neues Maß für den Wert des Magnetfeldes – nämlich die Voltsekunde je Windung. Seinerzeit hatten wir – als vorläufiges Maß des Magnetfeldes – das Maxwell kennengelernt. Dieses Maß steht mit der Vs/Wicklung in folgender einfachen Beziehung:

$$1 \text{ Vs/Wicklung} = 10^8 \text{ Maxwell.}$$

Andere Frequenz

Jetzt behalten wir den Scheitelwert der Wechselspannung sowie die Spule mit ihrer Windungszahl und ihren Abmessungen bei. Wir verdoppeln lediglich die Frequenz. Bei doppelter Frequenz dauert eine Periode halb so lang. Zu einem Viertel einer Spannungsperiode gehört demzufolge nur noch die Hälfte der Voltsekunden, da ja jeder einzelne Spannungswert nur halb so lang auftritt wie zuvor. Damit halbiert

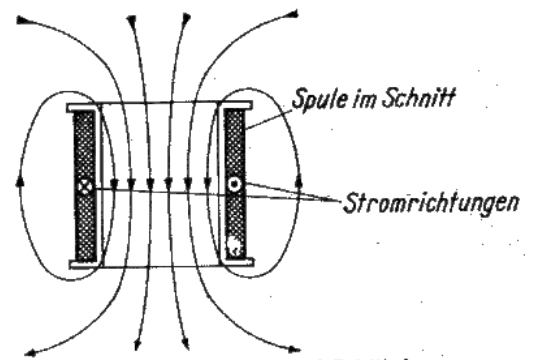


Bild 6 Magnetfeld angedeutet durch 6 Feldlinien.

sich der Scheitelwert des Magnetfeldes. Halb so großer Magnetfeldwert erfordert in unserem Fall die Hälfte der Amperewindungen und damit halben Strom. Halber Strom aber bedeutet bei gleichem Wert der Spannung doppelten Widerstand. Hieraus ergibt sich die Regel:
Der durch das Magnetfeld bedingte Spulenwiderstand ist der Frequenz verhältnisgleich. (In unserem Beispiel gehört zu doppelter Frequenz doppelter Widerstand.)

Induktiver Widerstand

Der Widerstand eines Widerstandstabes ist ein Wirkwiderstand. Hierin wird elektrische Leistung in Wärmeleistung umgesetzt. Es wird also mit der elektrischen Leistung eine Wirkung erzielt.

Bei unserer idealen Spule ist es anders. Zu ihr gehört kein Leistungsverbrauch. Sie gibt alle elektrische Arbeit, die sie aufnimmt und in ihrem Magnetfeld aufspeichert, jeweils wieder ab. Aus diesem Grunde nennt man ihren Widerstand einen Blindwiderstand.

Zu einem Blindwiderstand gehört bei zeitlich sinusförmigem Verlauf von Spannung und Strom eine Phasenverschiebung zwischen diesen beiden Größen um ein Viertel einer Periode. Die Phasenverschiebung kann positiv oder negativ sein, indem der Strom der Spannung um das Viertel der Periode nacheilt bzw. voreilt.

Den Fall des Blindwiderstandes mit voreilem Strom haben wir im Zusammenhang mit dem Kondensator kennengelernt. Wir nannten seinen Blindwiderstand „kapazitiv“.

Bei der Spule eilt der Strom der Spannung um ein Viertel einer Periode nach. Der Widerstand kann als Folge der von dem sich ändernden Magnetfeld hervorgerufenen (induzierten) Gegenspannung aufgefaßt werden. In diesem Sinne bezeichnet man den durch das Magnetfeld bedingten Blindwiderstand der (idealen) Spule als induktiven Widerstand.

Induktivität

Wir haben erfahren, daß der induktive Widerstand der Frequenz proportional ist. Um einen für den induktiven Widerstand maßgebenden Grundwert zu schaffen, könnte man diesen Widerstand auf ein Hertz beziehen. Das tut man jedoch nicht, weil der durch das Magnetfeld bedingte Zusammenhang zwischen Spannung und Strom außer für Wechselspannung und Wechselstrom auch sonst eine Rolle spielt und weil für diese anderen Fälle mit dem auf ein Hertz bezogenen Widerstand weniger bequem zu rechnen ist. Mit Rücksicht hierauf hat man den Grundwert so gewählt, daß er, mit dem 2π -fachen (= rund 6,28fachen) der Frequenz vervielfacht, den induktiven Widerstand ergibt.

Dieser Grundwert wird heute allgemein „Induktivität“ genannt. Früher einmal war hierfür der wesentlich längere Ausdruck „Selbstinduktionskoeffizient“ üblich. Als Formelzeichen der Induktivität dient das große lateinische L. Die Einheit der Induktivität wird Henry genannt und mit einem großen lateinischen H abgekürzt.

Vervielfacht man die in Henry ausgedrückte Induktivität mit dem 6,28fachen der Frequenz in Hertz, so erhält man den induktiven Widerstand in Ohm.

Zu Bild 2 gehört ein induktiver Widerstand von rund $40\ \Omega$. Um hieraus die Induktivität zu ermitteln, müssen wir die $40\ \Omega$ durch das 6,28fache der Frequenz von 50 Hertz teilen. Das gibt als Induktivität etwa 127 mH.

Fachausdrücke

Gegenspannung: Spannung, die einer anderen Spannung entgegenwirkt. Meist ist dabei die andere Spannung die angelegte Klemmenspannung.

Henry: Einheit der Induktivität. Ein Henry (abgekürzt H) ist gleichbedeutend mit einer Voltsekunde je Ampere.

Induktivität: Größe, die mit dem 6,28fachen der Frequenz vervielfacht den induktiven Widerstand ergibt.

Selbstinduktionskoeffizient: Anderer Ausdruck für Induktivität.

Windungsspannung: Spannung, die auf eine Windung einer Wicklung (Spule) entfällt, also Gesamtspannung : Windungszahl.
